

最近の乾式及び湿式における粒子分級技術 Recent Technology of Dry and Wet Type Particle Separation Process

吉田 英人^a, 福井 国博^b
Hideto YOSHIDA and Kunihiro FUKUI

^{a, b} 広島大学大学院工学研究院 化学工学専攻 教授

^{a, b} Professor, Department of Chemical Engineering, Hiroshima University, Japan

Abstract

Recent high performance technologies of dry and wet type particle separation process are explained. For the dry-cyclone, the use of apex cone in the inlet of dust box is effective to improve particle separation efficiency. Because the upward fluid velocity decreases by use of the apex cone, then the number of escaping particles decreases in this case.

The optimum cone angle of the apex cone is detected. The use of the additional air jet flow near the upper plate and inlet guide plate are also effective to improve particle separation efficiency.

For the wet type particle classification, the use of electro potential and gravity force on the particles is effective to realize sub-micron particle classification.

緒言

微粒子を対象とした分級及び粉碎操作は粉体を扱う工業プロセスで重要である。近年、粉体を扱う工業プロセスにおいて、粉体の付加価値を高めるため、微粉でかつ粒子径分布が制御されたものを要求する傾向が強くなっている。例えば液晶や電池材料及び半導体関連分野において、小型でも高性能な製品を製造するために、粒子径が $1\mu\text{m}$ 以下で粒子径分布幅の狭い粉体材料調整技術が強くとめられている。ここでは筆者の研究室で検討してきた乾式及び湿式操作における高精度な粒子分級手法に関して解説する。

サイクロンは構造が簡単で、安価に設置できるため広く実用化されている。一般的には乾式サイクロンは集塵装置として利用されているが、分級機としての利用もかなりなされている。この場合には分離径の制御技術が重要な課題になる。従来のサイクロンの分離径は、一般に数 μm が限界であるといわれていた。しかしながら近年、サイクロンの各部装置寸法の改良等

により、従来不可能とされていたサブミクロン領域の分級及び分級径の可変操作がかなり精度良く行われる様になってきた^{1,3,4,10)}。

ここでは乾式のサイクロンの粒子分離性能を向上させる目的で、サイクロン捕集箱入口部に設置した逆円錐の効果について説明する。次にブローダウンを行った場合の検討結果を解説する²⁾。次に分離径をサブミクロン領域で可変操作するために、サイクロン内部に局所的な流動制御法を適用した結果を説明する。また湿式分級については水篩装置の高性能化について解説する。従来の水篩装置は粒子に作用する外力として重力のみが利用されてきた。ここでは重力と静電気力の併用操作に関しての検討結果を解説する。

1 サイクロン捕集箱入口に設置した逆円錐の効果

サイクロンの粒子捕集効率を上昇させるには、通常は入口含塵速度を上昇させる手法が一般的である。し

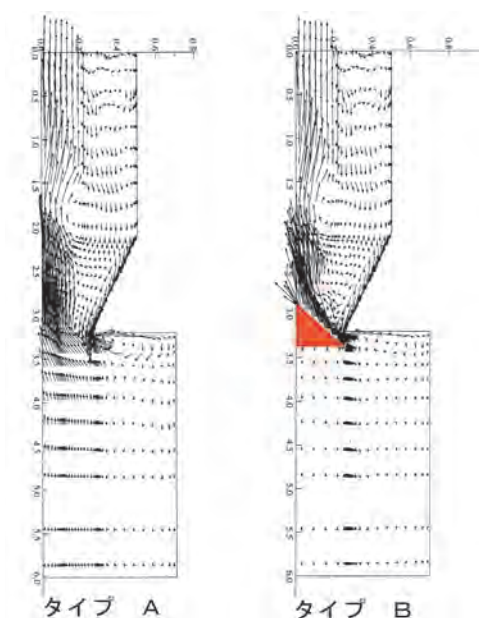


図1 サイクロンの捕集箱入口に設置逆円錐の有無が装置内部の流体挙動に及ぼす影響
Fig. 1 Effect of apex cone in the dust box on fluid velocity distribution

かしながらこの方法では、サイクロンの圧力損失が上昇することになり所要動力の増加が必要になる。ここでは圧力損失の増加を伴わないで、粒子捕集効率を上昇させる方法について説明する。サイクロンの粒子捕集効率を上昇させるには、一度捕集箱内部に流入した粒子が再び上昇気流に伴ってサイクロンの出口管部へ移動する粒子数を低減させる対策が効果的である。この操作を実現するにはサイクロンの粒子捕集箱内部における上昇気流速度成分を低減させることが重要である。

図1はサイクロンの捕集箱上部の入口部近くに逆円錐を設置すると、捕集箱内部の気流がどのように変化するかについて流体の数値解析を実施した結果である⁶⁾。図中には比較のために逆円錐を使用しない標準の場合をタイプAとし、逆円錐を設置した場合をタイプBとした。タイプAの場合には捕集箱上部の中心軸近くでかなりの上昇気流速度成分が存在することがわかる。一方タイプBにおいては逆円錐より下部の領域で、気流速度成分の大きさがタイプAと比較してかなり小さくなっている。つまりタイプBにおいては、捕集箱内部の上昇気流速度がかなり低減しているため、一度捕集箱に流入した粒子が出口管へ移動して未捕集となる確率を低下させることが期待できる。この点を確認するため、タイプA、Bについて粒

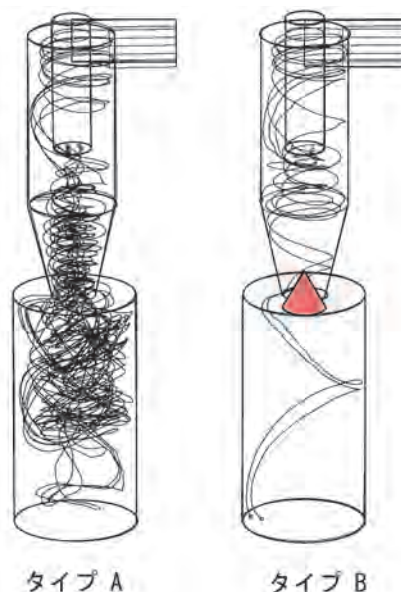


図2 粒子軌跡の計算結果 ($D_p = 1.2 \mu\text{m}$)
Fig. 2 Simulation results of particle trajectories ($D_p = 1.2 \mu\text{m}$)

子軌跡を計算した結果を図2に記す。両者共に粒子の入口部入射座標は同一であり、粒子径は $1.2 \mu\text{m}$ とした。タイプAでは捕集箱内部に入った粒子は何度も回転運動をした後に一部の粒子は上昇気流に伴って移動して最終的には未捕集となることが確認される。しかしながら逆円錐を用いたタイプBの場合には捕集箱内部に入った粒子は捕集箱底面に付着して捕集されている。この理由は前述したように、タイプBの場合には捕集箱内部の上昇気流速度がタイプAと比較してかなり低減しているために生じたと考えられる。つまり図1の逆円錐を使用しない場合は、中心軸近傍の気流上昇速度が大きくなるため粒子が捕集箱から上部に移動しやすくなったものと考えられる。

次に逆円錐の頂角の変化により、逆円錐近傍の流動がどのように変化するかについて検討した結果を図3に記す¹¹⁾。図中の写真は、実験前に逆円錐の傾斜面に泡を付着させた後に一定時間気流をサイクロンに流入させた後、傾斜面上の泡の分布がどのように変化するかを調べた結果である。ただし逆円錐の頂角は40度から80度まで変化させてあり、また図中に記したベクトル記号は数値流体解析により得られた流体速度分布の計算値である。図3より頂角70度の場合が最も泡の残存する領域が広がっている。ここで泡の存在していない領域は流体が泡を移動させて泡を消失させ

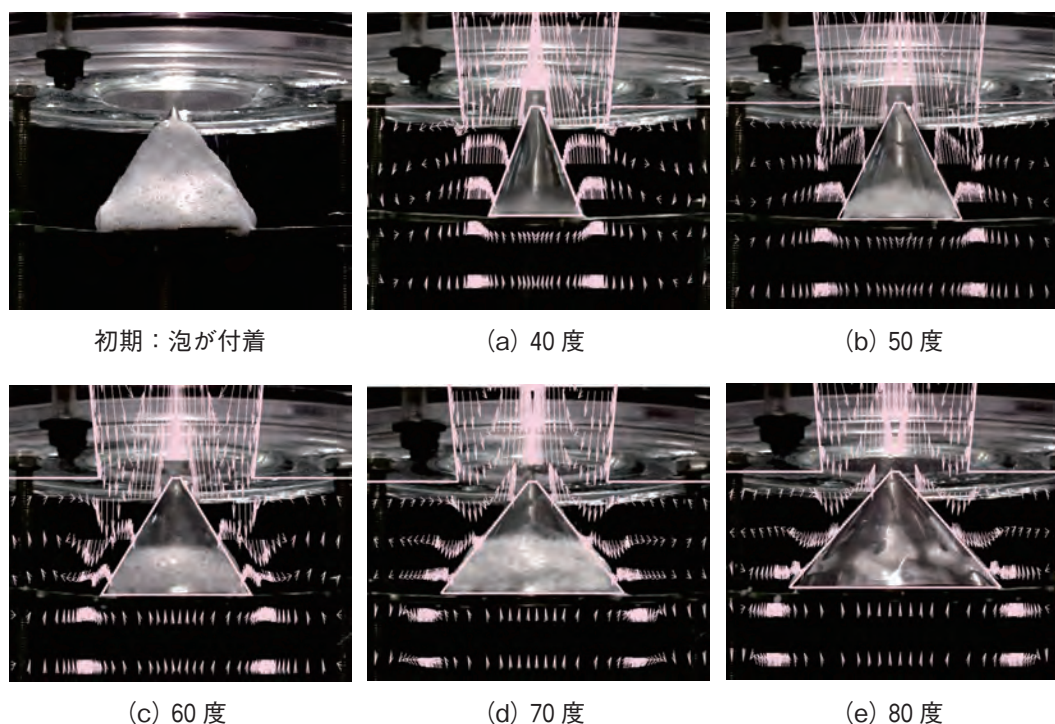


図3 逆円錐近傍の流体速度分布の様子と泡の付着状態
($Q_t = 500 \text{ L/min}$, $q = 100 \text{ L/min}$)

Fig. 3 Fluid velocity distribution near the apex cone and state of foam remained after experiment

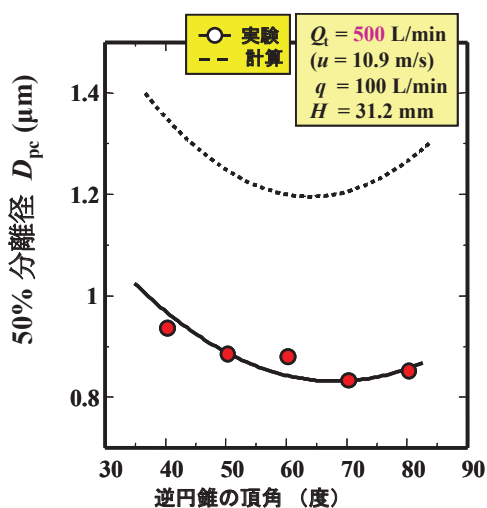


図4 50%分離径に及ぼす逆円錐頂角の影響
 $Q_t = 500 \text{ L/min}$

Fig. 4 Effect of apex cone on 50 % cut size

たことにより発生したものと考えられる。頂角70度の場合には逆円錐の上部傾斜面に沈着した粒子のみが上方出口管に移動し、その他の領域に沈着した粒子は捕集される確率が高いと推定される。図4は逆円錐の

頂角の変化がサイクロンの50%分離径に及ぼす影響を調べた結果である。この図より逆円錐頂角が65から70度程度で50%分離径が小さくなっている。なお波線は数値計算の結果であり、定性的ではあるが逆円錐頂角65度程度が最も分離径が小さくなっており、計算値は実験値と同様な傾向である。以上の検討結果から判断して、サイクロンの粒子捕集箱入口に設置した逆円錐は粒子の捕集効率の向上に有効であることがわかる。ただし粒子と壁面間または粒子と粒子間の付着性が強い粉体では逆円錐が設置してあると、粒子の壁面沈着による堆積成長が発生する場合もある。よって逆円錐の利用は流動性の良好な粉体を扱う場合においてのみ利用するのが望ましい。

2 ブローダウン方式サイクロン

次にサイクロンにおいて捕集効率を向上させる別の方法として、ブローダウン操作が行われる場合がある。ここではブローダウンの有無が粒子分離性能にどう影響するかについて解説する。ブローダウン操作は捕集箱部の気流の一部を連続的に吸引する操作で液体サイ

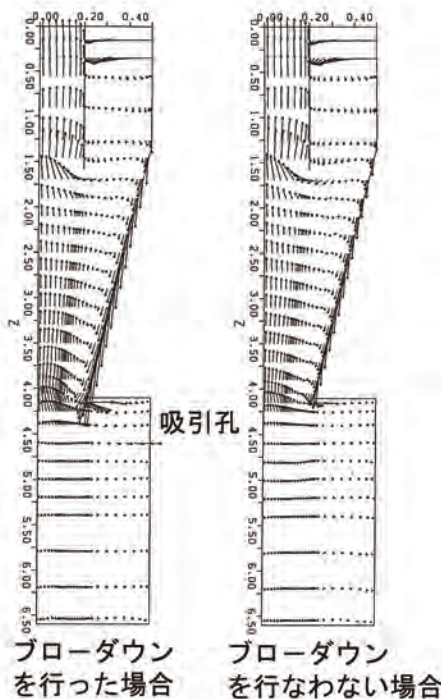


図5 ブローダウン有無における気流速度分布の相違 ($\theta = 67^\circ$)

Fig. 5 Fluid velocity distribution with and without blow-down ($\theta = 67 \text{ deg.}$)

クロンではアンダーフローとして常に利用されている。ここでは乾式サイクロンにおいてブローダウンを行った場合、ブローダウン流量比は全流量の10%とし、吸引孔は粗粉捕集箱の上部円筒壁部に設けた場合の結果を記す。図5はブローダウンの有無による気流速度ベクトルを同一の円周角 $\theta = 67^\circ$ について示したものである⁷⁾。この図からもブローダウンを行うと、円錐壁近傍の下降流の大きさが大きくなるのが認められる。ブローダウンを行うと、行わない場合と比較して一般により微粒子まで捕集が可能となる。この理由は円錐壁部で捕集された粒子が、壁近傍の下降流速度が大きいために円滑に粗粉捕集箱に入るためであろう。

次にブローダウンを行った場合の部分分離効率について解説する。サイクロン入口部及びブローダウン部における流量、粒子濃度をそれぞれ Q_0, C_0 及び Q_b, C_b とする。ここで粒子の拡散の効果が無視できると仮定して $D_p \rightarrow 0$ にすると、部分分離効率は次式となる。

$$\Delta\eta = \frac{Q_b C_b}{Q_0 C_0} \quad (1)$$

仮定としてサイクロン内で粒子濃度が一定とみなせる場合は $C_b = C_0$ となり、部分分離効率はブローダウン

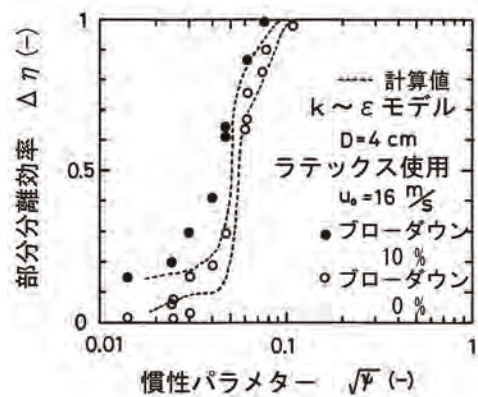


図6 粒子分離性能に及ぼす乾式サイクロンのブローダウンの効果

Fig. 6 Effect of blow-down on particle separation performance of dry-cyclone

流量比となる。

$$\Delta\eta = \frac{Q_b}{Q_0} \quad (2)$$

部分分離効率の実測値と計算値の比較を図6に示す。ただしブローダウン流量比は10%の条件である。ここで試験粒子として使用したラテックス粒子は、一度壁に捕集されると再飛散しにくいいため、計算における仮定と矛盾しないと考えられる。図中には比較のために、ブローダウンを行わない場合の実験値も併記してある。ブローダウンを行った場合、粒子慣性パラメータの小さい領域で部分分離効率がほぼ一定値を示す傾向にある。またブローダウンを行うと分離径がより小さくなっている。これはブローダウンを行うと円錐壁近傍の気流の下降速度がより大きくなることにより生じたものであろう。

ブローダウンを行った場合、粒子慣性の小さい領域で部分分離効率が一定値を示し、この傾向は常にアンダーフローを行う液体サイクロンの結果と類似している^{8,9)}。

3 局所的な流動制御法を利用した分離径移動操作

3-1 試作した実験装置

乾式サイクロンを分級機として利用する場合には分離径の移動操作が必要になる。しかしながら、従来のサイクロンではこの操作は難しいとされていた。最近ではサブミクロンの範囲において分離径が可変にできる分級機が要望されている。この課題に対応するた

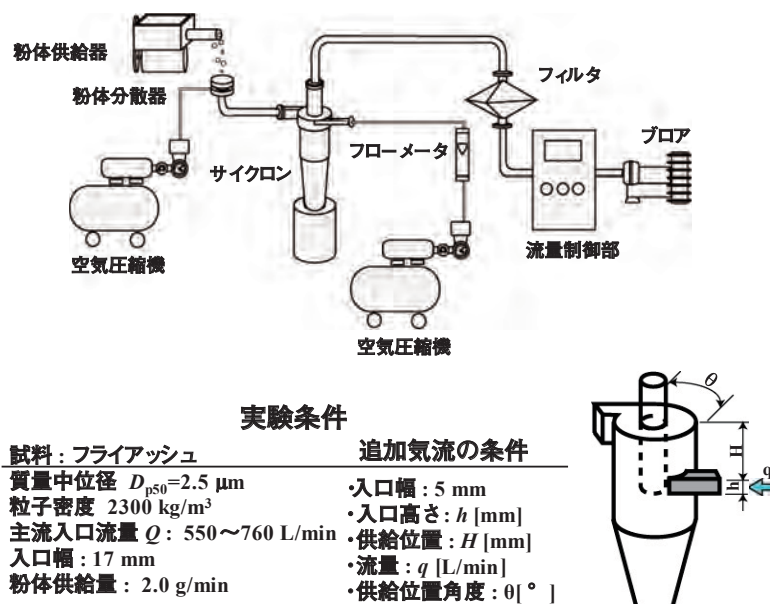


図7 追加流を利用した乾式サイクロン
Fig. 7 Dry-cyclone with additional jet flow

め、ここではサイクロンの円筒部に局部的に追加気流を導入し分離径を制御する新しい手法について、実験及び数値シミュレーションにより検討した結果を示す¹²⁾。分級実験に使用した乾式サイクロン装置を図7に示す。サイクロンの内径は72 mmであり、各部の寸法は既報の実験で分級性能が優れているものを基準にして決定されている。サイクロンの分離径をサブミクロン領域まで小さくするには、円筒部や円錐部における気流の回転速度を速くして粒子に作用する遠心力を増大することが有効である。従来のサイクロンでは気流の導入部が原料供給部1ヶ所のみであるため、サイクロンの円錐部下部では気流回転成分の減衰を生じやすい。そこで原料導入部とは別に、サイクロン入口速度よりも極めて速い加速流を局部的に導入することが有効であるが、最適な導入手法については検討されていない⁵⁾。使用した粉体はフライアッシュであり、質量中位径 $2.5 \mu\text{m}$ 、幾何標準偏差2.5である。サイクロンの入口平均速度は12.5から22.5 m/sの条件で実験した結果である。

3-2 分級径の可変操作

追加気流の導入によりサイクロンでの粒子分離性能を向上させる場合、気流導入位置の最適な場所及び入口構造を調べるのが重要である。

サイクロンの入口流量を一定条件の550 L/minと

して、追加気流量を変化させた場合の粒子分離特性を図8に示す。追加気流量の増加により50%分離径が $1.4 \mu\text{m}$ から $0.7 \mu\text{m}$ へと小さくなっており、捕集効率が93.2%から98.1%に増大している。ただし追加気流部管高さは性能が良かった $h=5 \text{ mm}$ の条件の結果である。局所的な追加気流の導入が分離径制御に有効であるといえる。

4 捕集効率の向上に有効な2種類の操作を併用した場合

サイクロンの分離径をサブミクロンの範囲で高精度に可変にするためには前述の追加流の利用が有効である。一方筆者らはサイクロン入口部に設置した移動式の案内板(図9参照)も分離径の可変操作には有効であることを見出している¹⁾。よって両者の手法を併用して利用すると最も捕集性能が向上することが期待される。図10は両者の手法を併用した場合の有効性について、試験用粒子として関東ローム(JIS No.11)を使用して実験的に検討した結果である。両者の手法を用いない標準の場合の50%分離径は約 $1 \mu\text{m}$ となっている。しかしながら移動式の案内板の開口比を0.5として、さらに追加流量を200 L/min導入した場合における50%分離径は約 $0.5 \mu\text{m}$ 程度にまで小さくなっている。

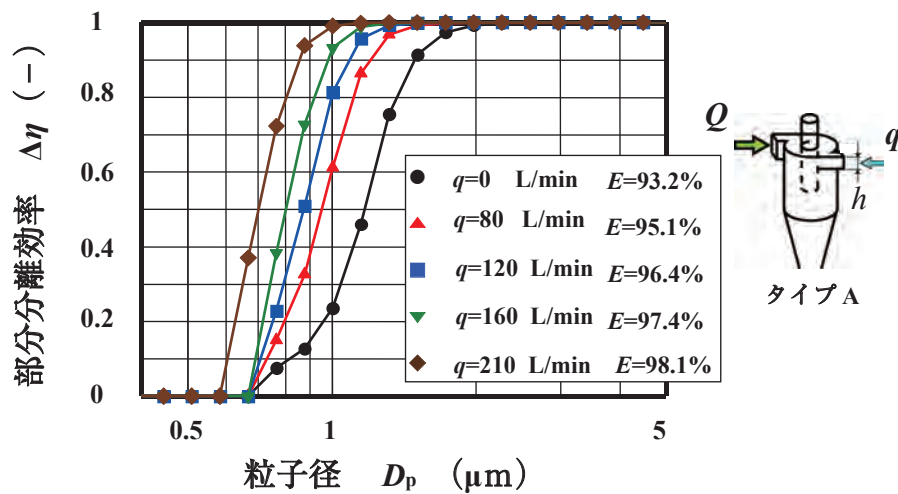


図8 部分分離効率に及ぼす追加気流流量の影響
($Q = 550 \text{ L/min}$, $h = 5 \text{ mm}$)

Fig. 8 Effect of additional jet flow on partial separation efficiency
($Q = 550 \text{ L/min}$, $h = 5 \text{ mm}$)

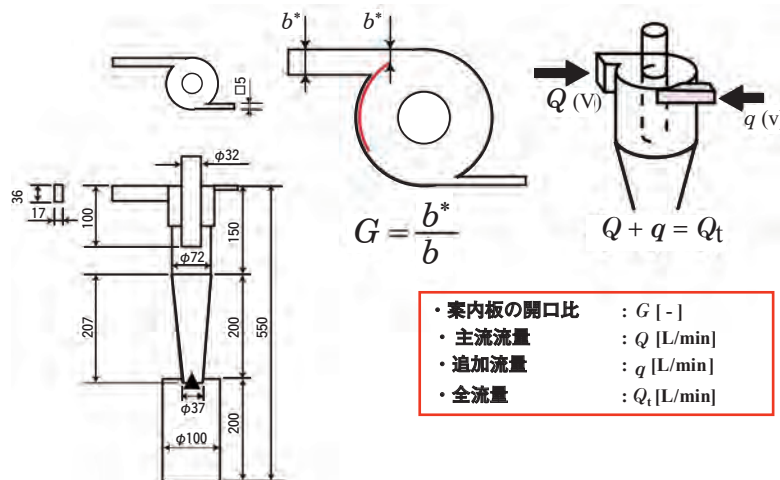


図9 案内板と追加流を併用したサイクロン

Fig. 9 Dry-cyclone with additional jet flow and inlet guide plate

サイクロンにおける局所的追加流の利用は付着性の強い粉体や扱いにくい微粉金属粉の分級においてもその利用が期待される。その理由はサイクロン内壁への付着量低減と粒子捕集効率の向上が同時に達成できる可能性があるためである。よって今後更に詳しく最適な追加流導入方法について検討する必要がある。

5 湿式分級装置

湿式分級操作は微粒子の分散が乾式よりも容易にな

るため、近年注目されている。湿式分級において分離径を $1 \mu\text{m}$ 以下にするには、強制回転を利用した遠心分離機が有効である。しかしながら、一般に遠心分離操作の場合、水篩よりも高濃度のサブミクロン分級操作が可能であるが、高速回転を利用しているため長時間の連続操作において回転軸の損傷が生じやすい¹⁷⁾。一方、水篩装置を利用した分級は原料溶液の供給ポンプのみが動力源となり、安価に製造できるため工業的に利用されている。しかしながら、分離径を $1 \mu\text{m}$ 以下にするには、沈降時間を極めて長くする必要があり

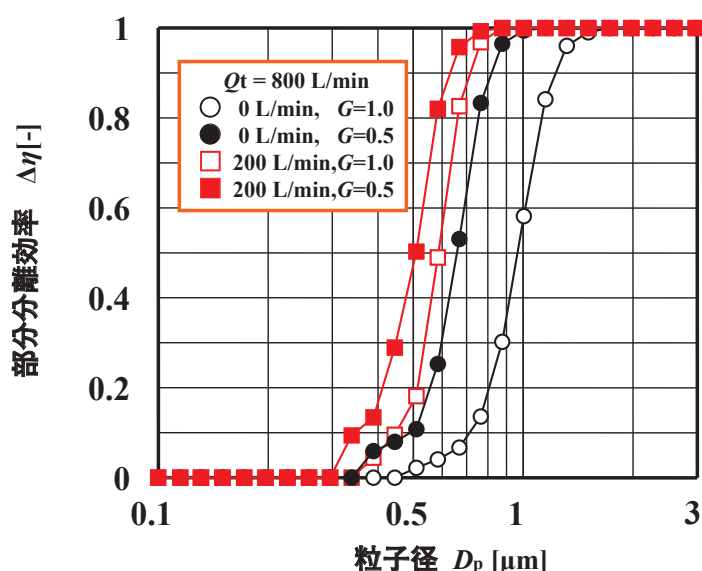


図 10 粒子の分離に及ぼす入口部案内板と追加流の併用の効果
 Fig. 10 Effect of the inlet guide plate and additional jet flow on particle separation performance

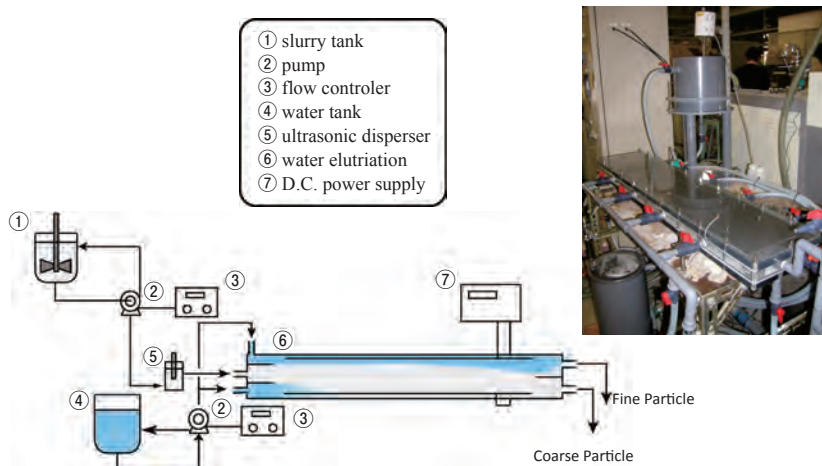


図 11 装置入口が 3 層構造からなる水篩
 Fig. 11 Horizontal type water sieve with three inlet sections

装置が大型となる。水篩装置の小型化には藤崎¹³⁾の研究があるが、一般に分離径を小さくする場合に水篩分級では装置が大型となる。

最近、液体中のスラリー粒子に静電場を印加することによる粒子分離操作への利用が試みられている¹⁴⁾。ここでは湿式の水篩分級において分離径を小さくする目的で、水平流および上下流型の装置内部に局部的に静電場を利用した新しい方法について説明する。その結果、高精度なサブミクロン分級が可能との興味ある知見が得られているので解説する¹⁸⁾。

6 水篩装置

6-1 水平流型の分級装置

水平流型の湿式分級装置を図 11 に記す¹⁵⁾。この装置の特徴として、分離径を小さくする目的で流れ方向と直交方向に外部から直流電場を印加できる構造となっている。入口部が 3 層構造となっており、原料スラリー液は入口中間部から流入している。原料液の上部及び下部から清浄水を供給する目的は、分級精度を向上させることが可能になるためである。試験粒子として液中で負に帯電しているシリカ粒子を利用した場合に

装置下部を正極、上部を負極とすることで、粒子の有効沈降速度として重力沈降に加えて、電気泳動による影響が加算される。よって微粒子でも短時間で沈降分離することが可能となる。

図12は入口部2層及び3層において、粒子分離特性を検討した結果であり、入口部が3層の場合が2層よりも50%分離経が小さくなっている。この理由は3層構造の場合は入口粒子は全体的に2層構造と比較

して、初期において既に下部の捕集面に近い状態となっているためである。入口部が3層構造の装置で、印加電圧を10Vにすると50%分離経が約 $1.3\mu\text{m}$ 程度にまで小さくすることが可能である。水平流型の装置は粗大な粒子が装置底部に堆積することになるため、長時間操作においては定期的に堆積した粒子を除去する操作が必要になる。この対策としては、上下流型の装置が有効となるため、次節にて検討した結果を記す。

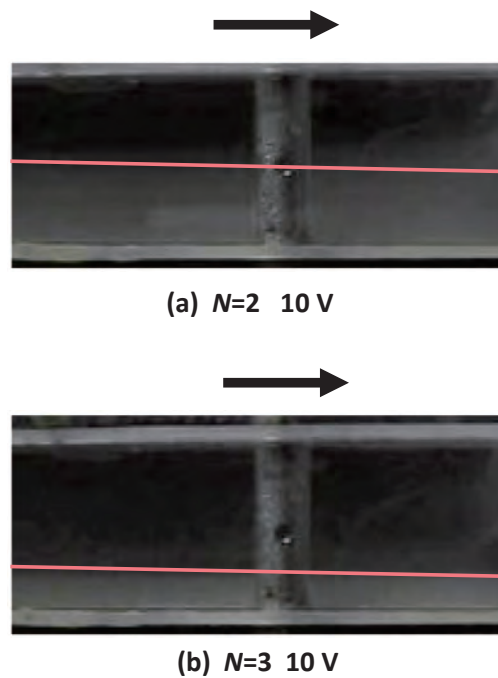
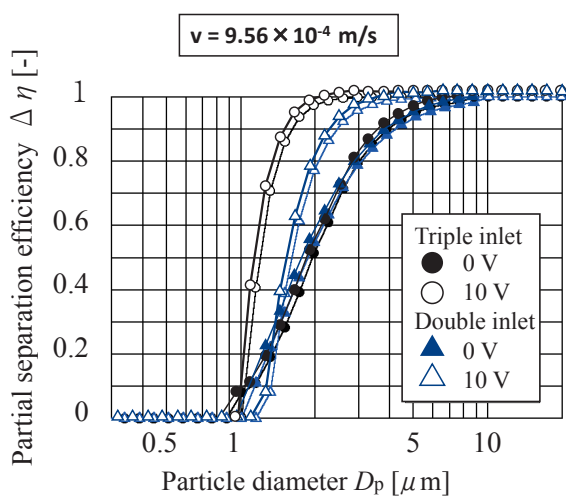


図12 粒子の分級に及ぼす入口部構造の影響
Fig. 12 Effect of inlet section number on particle separation performance

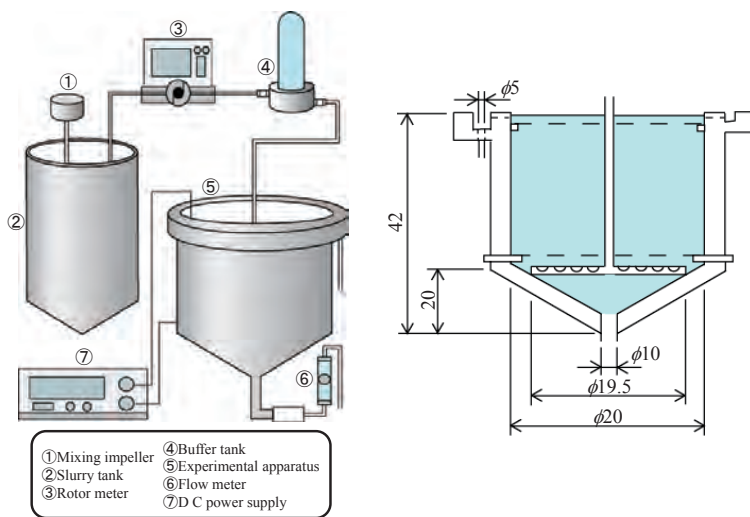


図13 湿式分級装置
Fig. 13 Wet type particle classification apparatus

6-2 上下流型の分級装置

試作した電場印加型の上下流形式の水篩分級装置を図13に示す¹⁸⁾。分級実験に使用したスラリー液は装置中心部を下流に流下した後に、下方の放射状に配置した液供給部から上方に向けて流出される。粗大な粒子は沈降速度が速いため下方から排出され、また微粒子は装置上部から放射状に流出する構造となっている。また原料液供給部および上部自由液面近傍には金属多孔板を設置して、装置内部での乱れ発生を低減させる構造となっている。粒子径が $1\mu\text{m}$ 以下に小さくなると、粒子の重力沈降速度が小さくなるため、原料液供給量を極めて小さくする必要があるとの欠点が存在する。この課題を解決するために、新型装置では上下に金属多孔板を設け、直流電圧を印加できる構造として、従来の水篩では難しかった湿式サブミクロン分級の可能性について検討された。

図14は分級機本体を示しており、原料液供給部及び上下に設置した金属多孔板電極の写真を併記してある。原料供給液は装置下面からできるだけ断面内を均一に上昇することが望ましいため、半径方向に6本の液放出管を設けて各管からなるだけ一様に原料液が流出できる構造となっている。試験粒子として高純度球形シリカを用いた。粒子径は 0.5 から $6\mu\text{m}$ に分布しており質量中位径は $1.87\mu\text{m}$ である。また溶媒としては直流電圧印加において電流値を低く抑えることが可能な脱イオン水が使用された。原料液の粒子濃度は $0.05\text{ wt}\%$ と一定にされた。原料のスラリー濃度を低

くした理由は、粒子の凝集を少なくして高精度な分級の可能性について検討することを目的としたためである。分級性能の評価には、装置が定常に達した後、粗粉及び微粉側のスラリー液をサンプリングして、その質量および粒子径分布をレーザー回折法(堀場製作所(株)製, LA-950)にて計測して部分分離効率および分級精度を用いて評価した。

7 実験結果

7.1 電場印加をしない場合

まず上下の多孔金属板に電場を印加しない場合の分級性能を評価した。液体サイクロンにおいてアンダーフロー側の流量を増加すると、 50% 分離径は小さくなったが¹⁶⁾、ここでの新型湿式分級機でも同様の傾向となった。なおこの装置における 100% 分離径については次式で計算した。

$$u_f = \frac{4Q_f}{\pi D^2} = \frac{(\rho_p - \rho_f) D_p^2 g}{18\mu} \quad (3)$$

上昇流型の分級装置においては流体の上昇流と粒子の下降方向の沈降速度が等しい条件で分離径を推算することが可能である。この装置の場合、装置上部出口近傍での平均上昇速度と粒子の沈降速度が等しい条件が 100% 分離径に対応するものと考えられる。

図15は分級性能に及ぼす上部の微粉側流量の影響を検討した結果である。微粉側流量を 15 から $45\text{ cm}^3/\text{min}$

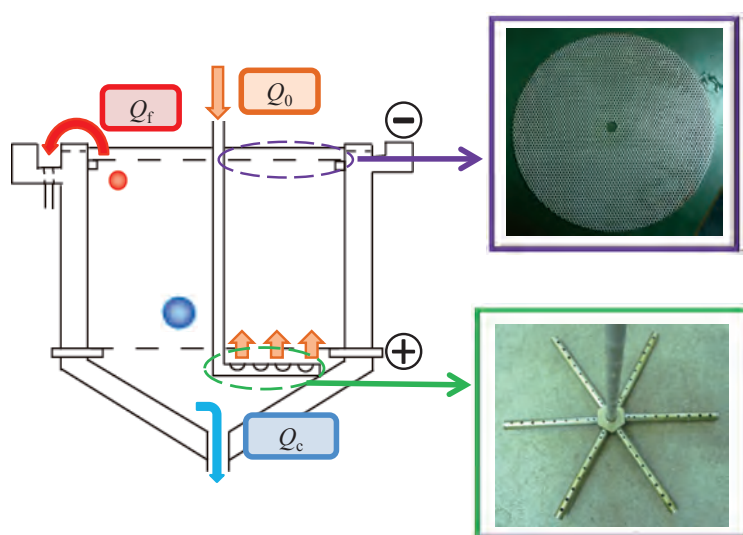


図14 分離装置の上部及び下部の詳細

Fig. 14 Details of upper and lower part of particle separation apparatus

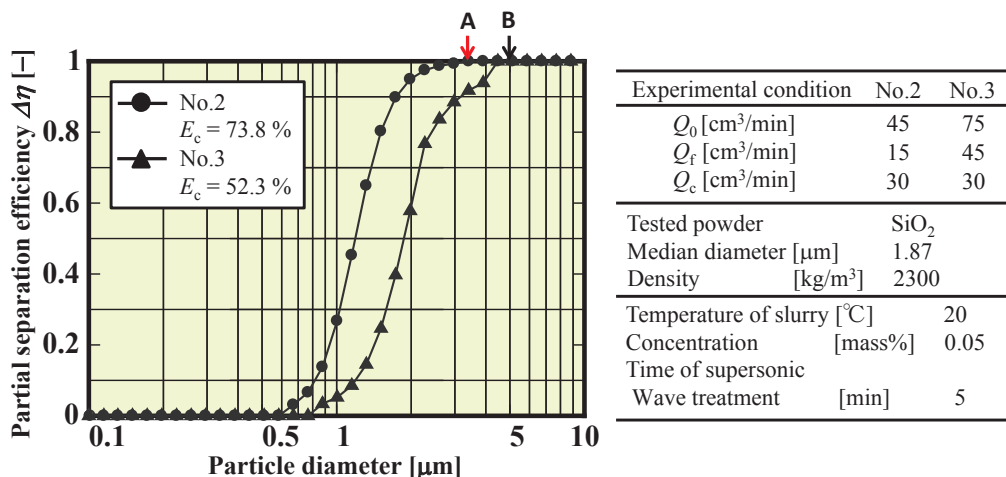


図 15 オーバーフロ流量が粒子分級特性に及ぼす影響
 Fig. 15 Effect of over-flow rate on particle separation performance

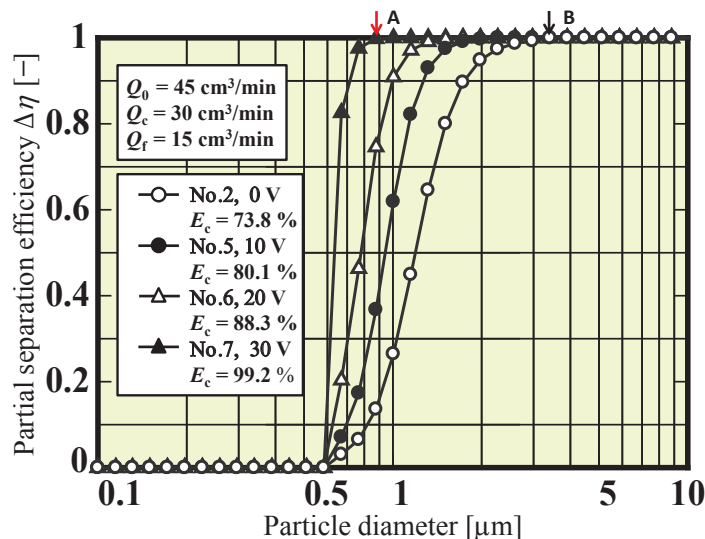


図 16 粒子分級特性に及ぼす印加電圧の影響
 Fig. 16 Effect of applied potential on particle separation performance

と増加させると、100%分離径は3.2μmから5μmと大きくなっており、これらの値は式(3)で計算した値とほぼ一致した。また条件2, 3共に分級精度指数 κ_1 についてほぼ等しくなっており、分離径を移動させるには出口流量の調整が重要となることがわかる。以上の結果より、本報での装置の場合、50%分離径の移動には下部の流量 Q_c が、100%分離径の移動には微粉側の流量 Q_f が主な操作変数であるといえる。

7.2 電場を印加した場合の分級実験

分離径をサブミクロンの範囲にするために、上下の

電極板に10から30Vの直流電圧を印加して分級実験を実施した。実験結果を図16に記す。電場を印加した場合に下方を正極とすることで、微小粒子の沈降速度が重力場の場合と比較すると増大することになる。電場を印加しない場合の50%分離径は約1.3μmであるが、印加する電圧の増加と共に50%分離径が小さくなり、30Vの条件ではその値は約0.62μmまで小さくなった。また100%分離径は約0.9μmとなり、サブミクロン分級が可能であることが確認できた。

ここで解説した連続型の湿式分級装置は比較的簡単な構造であるが、湿式のサブミクロン分級操作を高

精度で実施することができ、また分離径の移動操作も容易である。ただし本装置の場合は液中静電場を利用しているため、溶媒の選択が限られており、また電気伝導度の低い条件設定が必要である。以上の課題は存在するが、特定の条件が満足された場合には高精度な湿式分級が可能であり、今後の広範囲な用途に利用されることが期待できる。

結 言

乾式サイクロンの性能を向上させるには、捕集箱入口に設置した逆円錐やブローダウン操作の利用が望まれる。また従来のサイクロンでは、プラントが稼働中

において分離径の変換操作を実施することは一般に難しかった。しかしながら、ここで解説した円筒壁上部における局所的な追加流の利用は効果的であることがわかってきた。また付着性の強い粉体でも局所的な追加流を利用することで、サイクロン内部壁面における粉体付着量の低減効果が期待される。

さらにサイクロン入口部に案内板を設け、また局所的な追加流利用の併用操作も高精度な分級を達成するには有効である。

次に、連続式水篩装置において、局所的に直流電圧を印加できる、新しい形式の連続型分級機を考案し、粒子分離性能を検討した結果、サブミクロン分級が可能との知見が得られている。

参考文献

- 1) H. Yoshida, T. Saeki, T. Fujioka and T. Fuyuki; "Fine Particle Separation by Revised Type Air-Cyclone Classifier", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 19, 3, pp.476-482 (1993).
- 2) H. Yoshida, T. Fujioka, K. Hashimoto and K. Nagahashi; "Effect of Blow-down on Fluid Flow and Particle Movement in Cyclone Classifier", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 21, 3, pp.594-602 (1995).
- 3) H. Yoshida, T. Yamamoto, K. Okanishi and K. Iinoya; "Elaborate Classification of Fly-ash Particles by Bench Scale Air Cyclone", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 23, 363-370 (1997).
- 4) K. Iinoya, T. Fuyuki, Y. Yamada, H. Hisakuni and E. Sue; "Dry Sub-micron Classification by a Small Blow-down Cyclone", *KONA Powder and Particle*, 11, 223-227 (1993).
- 5) L.X. Zhou, and S.L. Soo; *Powder Tech.*, 63, pp.45-53 (1990).
- 6) H. Yoshida, S. Akiyama, K. Fukui, S. Taniguchi and A. Miyatake; "Fine Control of Cut Size with Dry Cyclone", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 27, 5, pp.574-580 (2001).
- 7) H. Yoshida, T. Saeki, K. Hashimoto and T. Fuyuki; "Size Classification of Sub-micron Powder by Air Cyclone and Three-dimensional Analysis", *J. Chem. Eng., Japan*, 24, 5, 640-647 (1991).
- 8) Y. Isshiki, K. Fukui, H. Yoshida and A. Kobayashi; "The Control of Particle Size Separation by Use of Hydro-cyclone", *J. of Soc. of Powder Technology, Japan*, 34, 9, pp.690-696 (1997).
- 9) H. Yoshida, S. Akiyama, K. Fukui and A. Kumagaya; "Particle Classification with Improved Hydro-cyclone Separator", *J. of Soc. of Powder Technology, Japan*, 38, 9, pp.626-632 (2001).
- 10) K. Iinoya, T. Fuyuki, Y. Yamada, H. Hisakuni and E. Sue; "Dry Sub-micron Classification by a Small Blow-down Cyclone", *J. of Soc. of Powder Technology, Japan*, 29, 5, pp.351-355 (1992).
- 11) H. Yoshida, Y. Nishimura, K. Fukui and T. Yamamoto; "Effect of Apex Cone Shape on Fine Particle Classification of Gas-cyclone", *Powder Technology*, 204, pp.54-62 (2010).
- 12) S. Akiyama, H. Yoshida, K. Fukui, K. Ono, R. Nobukiyo and Y. Inada; "Improvement in Classification Performance of Gas-cyclone by Local Fluid Velocity Control", *J. of Soc. of Powder Technology, Japan*, 42, 6, pp.401-408 (2005).
- 13) K. Fujisaki; "Enhancement of Settling Tank Capacity with Inclined Tube Settlers", *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 30 (5), 568-573 (2004).
- 14) T. Yamamoto, Y. Sato and K. Hishida; "Separation Technique of Sub-micron Particles Using

- Electrokinetically Driven Flow”, Transactions of The Japan Soc. of Mechanical Engineers, Ser. B, 70 (697), 140-147 (2004).
- 15) 吉田英人, “湿式水篩操作による微粒子の高精度分級”, 化学装置, No. 5, pp. 39-42 (2010).
- 16) Y. Isshiki, K. Fukui, H. Yoshida and A. Kobayashi; “The Control of Particle Size Separation by Hydro-Cyclone”, J. Soc. Powder Technol., Japan, 34 (9), 690-696 (1997).
- 17) T. Yamamoto, T. Kotani, K. Fukui and H. Yoshida; “Experimental and Computational Study of Particle Classification by Improved Centrifugal Separator”, J. Soc. Powder Technol., Japan, 44, 12, pp.861-867 (2007).
- 18) 松沢光晴, 高井健二, 坂本裕太郎, 村上公威, 福井国博, 山本徹也, 吉田英人, “電場印加型の垂直流型水篩による微粒子の高精度分級”, 粉体工学会誌, Vol. 51, No. 2, pp. 68-76 (2014).